

Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent

Sediment Dynamics in the St. Lawrence Estuary

Georges Drapeau

Volume 46, numéro 2, 1992

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/032907ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/032907ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Drapeau, G. (1992). Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*, 46(2), 233–242. <https://doi.org/10.7202/032907ar>

Résumé de l'article

Les marées, les vagues et la formation de la glace en hiver sont les principaux agents physiques de la dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent. La végétation joue un rôle déterminant dans la formation des schorres. L'estuaire du Saint-Laurent mesure 400 km de longueur, 70 km de largeur en aval et 15 km à la hauteur de l'île d'Orléans. Les dimensions de l'estuaire sont telles que les conditions hydrodynamiques qui prévalent en aval sont essentiellement marines, tandis que celles qui prévalent en amont sont typiquement estuariennes. La marée est de prédominance semi-diurne; le marnage est de 4,2 m à l'embouchure et atteint 7,5 m à l'autre extrémité. Les vagues peuvent atteindre une hauteur maximale de 4 m dans la région adjacente au golfe du Saint-Laurent et diminuent progressivement de hauteur vers l'amont selon la longueur des fetchs. La glace se forme en décembre dans l'estuaire et persiste jusqu'en avril. La glace joue un rôle très important dans l'estuaire du Saint-Laurent; elle transporte des sédiments de toutes tailles, des argiles jusqu'aux blocs, elle erode le schorre et la slikke, mais elle protège aussi le littoral de l'action des vagues. L'échange de sédiments entre le littoral et le large est un processus important, particulièrement dans la partie amont de l'estuaire où il est relié à des cycles saisonniers d'érosion et de sédimentation. Le taux élevé de sédimentation dans les ports révèle l'importance du transport de sédiments en suspension dans la zone côtière. L'aménagement hydro-électrique de plusieurs tributaires entrave l'apport naturel de sédiments alluviaux et provoque ainsi l'érosion des littoraux adjacents. La croissance des schorres est sous la dépendance de la végétation, ce qui rend ces derniers plus vulnérables à l'érosion à mesure qu'ils progressent en deçà du profil d'équilibre hydrodynamique. Excepté pour la présence de la glace, qui est particulière aux estuaires des régions froides, la dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent est comparable à celle des autres estuaires dans la mesure où l'on tient compte des grandes dimensions de l'estuaire du Saint-Laurent.

Essai

DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE DES LITTORaux DE L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT

Georges DRAPEAU, INRS-Océanologie, Université du Québec, Centre océanographique de Rimouski, 310, allée des Ursulines, Rimouski, Québec G5L 3A1

RÉSUMÉ Les marées, les vagues et la formation de la glace en hiver sont les principaux agents physiques de la dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent. La végétation joue un rôle déterminant dans la formation des schorres. L'estuaire du Saint-Laurent mesure 400 km de longueur, 70 km de largeur en aval et 15 km à la hauteur de l'île d'Orléans. Les dimensions de l'estuaire sont telles que les conditions hydrodynamiques qui prévalent en aval sont essentiellement marines, tandis que celles qui prévalent en amont sont typiquement estuariennes. La marée est de prédominance semi-diurne; le marnage est de 4,2 m à l'embouchure et atteint 7,5 m à l'autre extrémité. Les vagues peuvent atteindre une hauteur maximale de 4 m dans la région adjacente au golfe du Saint-Laurent et diminuent progressivement de hauteur vers l'amont selon la longueur des fetchs. La glace se forme en décembre dans l'estuaire et persiste jusqu'en avril. La glace joue un rôle très important dans l'estuaire du Saint-Laurent; elle transporte des sédiments de toutes tailles, des argiles jusqu'aux blocs, elle érode le schorre et la slikke, mais elle protège aussi le littoral de l'action des vagues. L'échange de sédiments entre le littoral et le large est un processus important, particulièrement dans la partie amont de l'estuaire où il est relié à des cycles saisonniers d'érosion et de sédimentation. Le taux élevé de sédimentation dans les ports révèle l'importance du transport de sédiments en suspension dans la zone côtière. L'aménagement hydro-électrique de plusieurs tributaires entrave l'apport naturel de sédiments alluviaux et provoque ainsi l'érosion des littoraux adjacents. La croissance des schorres est sous la dépendance de la végétation, ce qui rend ces derniers plus vulnérables à l'érosion à mesure qu'ils progressent en deçà du profil d'équilibre hydrodynamique. Excepté pour la présence de la glace, qui est particulière aux estuaires des régions froides, la dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent est comparable à celle des autres estuaires dans la mesure où l'on tient compte des grandes dimensions de l'estuaire du Saint-Laurent.

INTRODUCTION

Les dimensions de l'estuaire du Saint-Laurent sont telles que les conditions hydrodynamiques qui prévalent dans la partie aval de l'estuaire sont typiquement marines, tandis que celles que l'on trouve en amont sont typiquement estuariennes. Les plages sableuses qui alternent avec les promontoires précambriens de la côte nord de l'estuaire maritime ont peu en commun avec les marais qui prédominent sur les deux côtes du moyen estuaire. Le Saint-Laurent diffère des autres grands

ABSTRACT *Sediment dynamics in the St. Lawrence Estuary.* Tides, waves and the formation of ice in winter are the principal physical agents of sediment dynamics in the St. Lawrence Estuary. Vegetation plays a predominant role in the building up of tidal marshes. The St. Lawrence Estuary is 400 km long, 70 km wide at the mouth and 15 km across at Île d'Orléans. The dimensions of the Estuary are such that the hydrodynamic conditions prevailing in the lower portion are typically marine while those prevailing in the upper section are typically estuarine. The tide is semi-diurnal and reaches 4.2 m at the mouth and 7.5 m at the head of the estuary. Waves may reach a maximum height of 4 m in the region adjacent to the Gulf of St. Lawrence and they diminish progressively towards the head depending on fetch lengths. Ice forms in December and persists until April. Ice plays a very important role in the St. Lawrence Estuary; it transports sediments of all sizes, from clays to boulders, erodes tidal marshes and tidal flats but it also protects the intertidal zone from wave action. Onshore-offshore exchange of sediment is an important process, particularly in the upper portion of the estuary where it is linked to seasonal cycles of erosion and sedimentation. High sedimentation rates in harbours reveal the importance of the nearshore suspension load. The hydro-electric harnessing of many tributaries cuts the supply of sediments to adjacent littoral zones and induces erosion. The growth of tidal marshes is controlled by the vegetation and they become more vulnerable to erosion as they depart from the hydrodynamic equilibrium profile. Except for the presence of ice which is particular to cold regions, nearshore sediment dynamics in the St. Lawrence Estuary are comparable to other estuaries when the large size of the St. Lawrence Estuary is taken into account.

estuaires de par sa forme et sa bathymétrie et aussi parce que la glace qui se forme en hiver modifie d'une façon importante la dynamique sédimentaire du littoral. Les marées, les vagues et la glace sont des agents prépondérants de la dynamique sédimentaire du littoral du Saint-Laurent, mais ils ne sont pas les seuls agents en cause. Localement, les échanges saisonniers de sédiments entre la zone intertidale et le large, la présence de grands affluents et même le broutage des marais intertidaux par de grandes volées d'oies blanches ont un impact sur la dynamique des sédiments littoraux. Certaines tendances sont directement reliées à la géométrie de l'estuaire. À partir de Québec, l'estuaire du Saint-Laurent mesure 400 km de long; sa largeur est de 70 km à l'aval (Pointe-des-Monts) et

de seulement 15 km à la hauteur de l'île d'Orléans (fig. 1). La géométrie de même que la direction prédominante des vents font en sorte que d'une part l'amplitude de la marée augmente vers l'amont et que d'autre part la hauteur et la période des vagues diminuent de l'embouchure ouverte sur le golfe du Saint-Laurent jusqu'en amont, où les fetchs sont dix fois plus courts. Si la formation de la glace en hiver n'est pas directement liée aux dimensions de l'estuaire, par contre la dérive de la glace l'est.

Les principaux mécanismes de la dynamique sédimentaire littorale sont bien identifiés dans l'estuaire du Saint-Laurent, mais la plupart des travaux concernent des sites spécifiques. Idéalement, on devrait pouvoir intégrer différentes études et arriver à formuler un modèle de l'ensemble de la dynamique des sédiments littoraux. Pour s'acquitter d'une telle tâche, il faudrait quantifier chaque processus autant dans l'espace que dans le temps. Par exemple, l'envasement des ports fournit des indications sur le transport littoral des sédiments en suspension, mais ces mesures sont trop disséminées pour être utilisées de façon systématique.

MÉCANISMES DE LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE VAGUES ET MARÉES

Les grandes houles formées dans le golfe du Saint-Laurent ne pénètrent pas dans l'estuaire. Les vagues observées dans l'estuaire sont produites localement par les vents qui soufflent en prédominance de l'ouest et qui ont tendance à s'aligner parallèlement à l'axe du Saint-Laurent. Les vagues de tempête les plus importantes sont formées par les vents d'est parce qu'ils soufflent sur des fetchs beaucoup plus longs. Les statistiques sur les vagues au large de Sainte-Anne-des-Monts indiquent que la période des vagues dépasse occasionnellement sept secondes et la hauteur atteint rarement cinq mètres; aux Escoumins la hauteur des vagues pour différentes périodes est presque d'un mètre inférieure à celle de Sainte-Anne-des-Monts (Pêche et Océans Canada, 1988). L'atlas climatologique de l'estuaire du Saint-Laurent (Vigeant, 1984) met en évidence la variabilité saisonnière des vagues en indiquant qu'en juillet et en août la probabilité que se forment des vagues de deux mètres dans l'estuaire maritime est à peu près nulle, tandis qu'en décembre elle dépasse 5 %.

L'action spécifique des vagues sur les littoraux de l'estuaire a été relativement peu étudiée. En aval de l'estuaire, l'énergie des vagues est relativement élevée pour un estuaire. Dans cette section les plages s'apparentent davantage à celles des côtes océaniques qu'aux plages estuariennes, même si l'influence de la marée est perceptible. La dimension des vagues diminue vers l'amont et leur action s'atténue parallèlement à l'augmentation du marnage. Cet effet est d'autant plus important que seules les plus grosses vagues sont en mesure de remettre les sédiments en mouvement. Dans la région de Trois-Pistoles, par exemple, le seuil d'entraînement du sable grossier, à une profondeur de 5 m, n'est dépassé que 4 % du temps (Drapeau et Morin, 1981). En fait, l'action des vagues sur les sédiments est limitée à de très faibles profondeurs, sauf durant quelques rares tempêtes.

Dans l'estuaire du Saint-Laurent, la marée est de type semi-diurne. Le point amphidromique de la composante semi-diurne

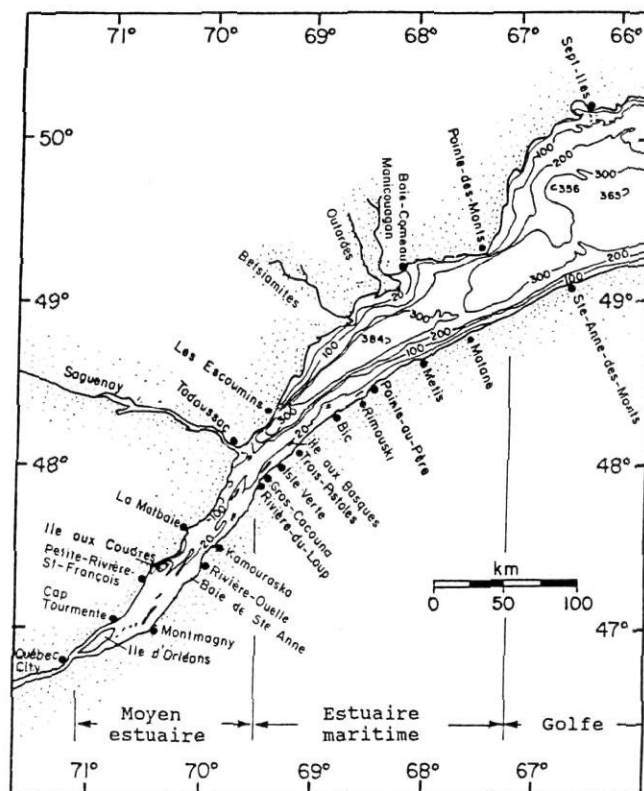


FIGURE 1. Carte de localisation du moyen estuaire et de l'estuaire maritime du Saint-Laurent.

Location map of the middle and maritime St. Lawrence Estuary.

M2 de la marée se situe près des îles de la Madeleine dans le golfe du Saint-Laurent, alors que la composante diurne K1 se trouve près de l'île de Sable sur la plate-forme continentale de la Nouvelle-Écosse. Le déphasage de la marée est d'une heure entre Sainte-Anne-des-Monts, à l'embouchure de l'estuaire, et le fjord du Saguenay; il est de trois heures du Saguenay à l'île aux Coudres (Godin, 1979). Le marnage augmente à mesure que la marée progresse dans l'estuaire; il passe de 4,2 m à Sainte-Anne-des-Monts pour atteindre 7,5 m à l'île d'Orléans.

Les marées jouent un rôle important du fait que les vagues lors du déferlement peuvent mobiliser les sédiments dans l'ensemble de la zone intertidale en raison du changement continu de niveau de la marée. Ainsi, une zone plus large est influencée par l'action des vagues mais de façon moins intense. C'est ce qui explique que dans l'estuaire la répartition et le tri des sédiments ne sont pas aussi bien démarqués que sur les littoraux à faible marnage et à forte énergie de vagues.

Les gradients des vagues et de la marée selon l'axe longitudinal sont tels que l'énergie des vagues diminue vers l'amont alors que le marnage augmente. À l'embouchure, l'estuaire est un environnement dominé par les vagues, tandis qu'en amont il est dominé par la marée. Les plages sableuses diminuent en dimension et en nombre vers l'amont, alors que les marais intertidaux deviennent de plus en plus étendus et nombreux. Les premiers véritables marais se trouvent à Mitis et à Pointe-au-Père, mais ils sont beaucoup plus petits que ceux du moyen estuaire.

ACTION DES GLACES FLOTTANTES

Dans l'estuaire du Saint-Laurent, la glace se forme au cours du mois de décembre et persiste jusqu'en avril (Brochu, 1960; Dionne, 1970). La formation de la glace progresse rapidement au cours de la deuxième quinzaine de décembre (Michel et Béranger, 1972). De janvier jusqu'à la fin de l'hiver la glace est plus abondante du côté sud de l'estuaire, où les estrans sont plus larges, à cause de la prédominance des vents du nord-ouest qui poussent la glace sur la côte sud. L'action combinée des vents et des courants résiduels libère l'estuaire de son couvert de glaces flottantes au cours de mars et avril (Markham, 1980). L'action des glaces flottantes est omniprésente le long des rives du Saint-Laurent. Les observations et les premières descriptions datent du XIX^e siècle. Entre autres, Dawson, en 1886, mentionne l'action de la glace flottante sur le rivage de la région de Mitis. La dynamique des sédiments dans la zone intertidale est fortement influencée par des processus glaciels qui contribuent à la sédimentation, au transport et à l'érosion des sédiments sur les rives du Saint-Laurent.

Les sédiments sont incorporés à la glace de plusieurs façons et ce phénomène est particulièrement important près des rives (Dionne, 1970). Le balancement de la marée amène la surface inférieure de la glace en contact direct avec les sédiments à chaque basse mer, de sorte qu'une partie de ceux-ci sont soudés par le gel à la surface inférieure de la glace. Le volume de sédiments ainsi incorporés dans la glace est extrêmement variable. Dionne (1970, 1984), à partir de nombreuses observations réparties sur une dizaine d'années dans différentes régions de l'estuaire, a évalué la charge de sédiments incorporés dans la glace à environ 200 kg/m². Troude et Sérodes (1988) ont extrait 13 carottes de la couverture de glace au cap Tourmente en mars 1982 afin d'en évaluer la charge sédimentaire. Les résultats de leurs travaux montrent la très grande variabilité de la concentration des sédiments gelés dans la glace, le seuil de fiabilité de 95 % étant de 84 kg/m² pour une valeur moyenne de 101 kg/m² pour l'ensemble de leurs mesures. Il est difficile d'établir le bilan global de la quantité de sédiments exportés de la zone intertidale vers le large parce que cette quantité peut varier beaucoup selon que la glace fonde sur place ou qu'elle est poussée vers le large par le vent. Des analyses densimétriques de carottes de glace ont montré que la densité de la glace peut augmenter considérablement en fonction de la charge de sédiments qu'elle contient, au point même de ne pouvoir flotter (Troude et Sérodes, 1988). À mesure que progresse la fonte de la glace surchargée de sédiments, celle-ci se déleste de ses sédiments jusqu'au moment où elle peut flotter et être emportée dans la mesure où le vent souffle vers le large. On estime que 80 à 90 % de la glace dérive finalement vers le large autant du côté de Montmagny que du cap Tourmente (Dionne, 1984, 1987; Troude et Sérodes, 1988).

L'action érosive de la glace est particulièrement évidente juste après le départ des glaces au printemps. L'érosion prend plusieurs formes, que ce soit le creusage de sillons par la glace elle-même (Dionne, 1969) ou par les blocs qu'elle contient (Dionne, 1988) ou encore l'arrachement de couches de sédiments qui forment de petits bassins (Dionne, 1985a).

Le transport des blocs est le phénomène le plus spectaculaire des glaces flottantes, car la capacité des glaces flottantes à transporter des blocs est impressionnante. Dionne (1988) a mesuré 176 blocs déplacés par les glaces à 18 endroits dans l'estuaire du Saint-Laurent. La plupart des blocs mesuraient de 1 à 2,5 m. Le plus gros bloc, mesurant 7,25 m de longueur et pesant 176 tonnes, a été déplacé sur une distance de 3 m. Un bloc de 50 tonnes a été déplacé de 40 m; un autre de 58 tonnes de 20 m. Bien qu'on puisse trouver des blocs n'importe où dans la zone intertidale, ils ne sont pas pour autant dispersés au hasard. La mobilité des blocs glaciels est très grande dans les sites exposés aux vagues et beaucoup moins importante dans les sites protégés (Allard et Champagne, 1980). On observe à plusieurs endroits des cordons de blocs frangeants à hauteur de mi-marée (Brochu, 1961; Dionne, 1972, 1989b). On trouve aussi des pavages de blocs particulièrement bien développés dans la région de Rimouski où les blocs sont entassés les uns contre les autres sur une largeur de 50 à 100 m et sur des distances qui atteignent parfois 2 km (Guilcher, 1981). Guilcher a observé cet alignement de blocs au niveau de mi-marée après avoir été témoin qu'au printemps les glaçons qui transportent les blocs sont poussés par le vent vers le rivage, mais ils ne peuvent atteindre le haut du littoral à cause de la présence du pied de glace, ce qui explique que les blocs soient délestés plus bas dans la zone intertidale. Une migration progressive des blocs du haut vers le bas du rivage a aussi été mise en évidence (Dionne, 1989a; Dionne et Brodeur, 1988a, 1988b).

ÉCHANGES DE SÉDIMENTS ENTRE LE LITTORAL ET LE LARGE

L'échange de sédiments entre la zone littorale et le large est un processus dont il faut tenir compte pour comprendre la dynamique sédimentaire du littoral dans l'estuaire du Saint-Laurent. Lucotte et d'Anglejan (1986) ont mené une série d'expériences dans la région du cap Tourmente. Ils ont mis en évidence les mécanismes d'échange entre le littoral et la masse des sédiments qui contribuent à la formation d'une zone de turbidité maximale dans le moyen estuaire. Des sédiments fins de cette zone de turbidité maximale, que l'on retrouve à la fin de l'hiver et au début du printemps dans le chenal nord de l'île d'Orléans, sont retenus dans les marais du cap Tourmente durant l'été, où la sédimentation est favorisée par la croissance de la végétation. Au cours de l'automne, les grandes oies blanches, durant leur migration vers le sud s'arrêtent pour se nourrir de rhizomes qui poussent dans les marais et contribuent ainsi à l'érosion intense des sédiments, évaluée à 4500 tonnes par marée. Ces sédiments retournent ainsi au large dans la zone de turbidité maximale et sont transportés vers l'amont dans le chenal de l'île d'Orléans. Le cycle annuel est complété quand la crue printanière ramène ce matériel vers l'aval où il est de nouveau retenu dans la zone intertidale.

Les échanges de sédiments sont moins intenses dans la baie de Sainte-Anne. D'Anglejan *et al.* (1981) ont montré qu'une intensification de la turbidité de la rivière Quennebago fournit aux marais intertidaux une source locale de sédiments en suspension. Dans de telles conditions, il s'établit un échange de sédiments entre la zone intertidale et l'estuaire, qui contribue à maintenir des niveaux de turbidité élevés.

VARIATIONS SAISONNIÈRES

En plus de la glace et des vagues dont l'influence est saisonnière sur les littoraux du Saint-Laurent, plusieurs grands marais du moyen estuaire sont altérés par le passage migratoire des grandes oies blanches (Sérodès et Troude, 1984; Dionne, 1985b). Sérodès et ses collaborateurs ont résumé les cycles saisonniers d'un marais intertidal typique. À l'automne, l'intensité des vagues augmente d'une part et d'autre part les marais sont envahis par les grandes oies blanches (quelque 250 000 oiseaux; Reed, 1984) qui se nourrissent du rhizome du scirpe d'Amérique. Dans les marais où les oies se retrouvent en plus grand nombre, l'affouillement du sol est tel qu'il provoque une érosion qui peut atteindre une quinzaine de centimètres (Dionne, 1985b). En hiver, sauf pour les sédiments incorporés dans la glace, il est difficile de vérifier l'importance des mouvements de sédiments sous la glace. Avec la venue du printemps, le retrait de la glace laisse la zone intertidale particulièrement vulnérable. Le dégel a diminué la cohésion des sédiments du haut estran qui sont plus facilement érodés par l'action combinée des vagues et des courants. Des plus, les oies blanches séjournent à nouveau dans les marais au cours de leur migration vers le nord. Au cours de l'été, la croissance de la végétation favorise la rétention des sédiments, d'autant plus que les vagues sont plus faibles, de sorte que l'accumulation des sédiments compense les pertes des saisons précédentes.

TRIBUTAIRES

Le Saguenay est le principal tributaire de l'estuaire du Saint-Laurent. Cependant, comme le Saguenay est un fjord, les sédiments qui en sortent sont des suspensions associées à des masses d'eau qui ont peu d'échanges avec le littoral. Les rivières contribuent à augmenter la charge sédimentaire du système dans lequel elles se déversent et cette contribution est proportionnelle au bassin de drainage et au niveau des précipitations (Langbein et Schumm, 1958). Les grands tributaires de l'estuaire du Saint-Laurent sont des sources importantes de sédiments qui ont un impact sur la dynamique sédimentaire du littoral (Dubois, 1980; Lambert, 1985). Dans le cas de la rivière Moisie, par exemple, Lessard et Dubois (1984) ont montré comment l'érosion du littoral en aval de cette rivière s'explique en fonction du taux de relèvement isostasique récent de la région. Lorsque le relèvement était intense au cours des derniers millénaires, la rivière a creusé son lit et transporté une grande quantité de sédiments jusqu'au Saint-Laurent. Présentement, le relèvement de la croûte terrestre est beaucoup moindre, de sorte que l'apport des sédiments est réduit d'autant, sans que les processus de transport littoral aient pour leur part diminué. Il en résulte que la partie aval du littoral qui était en équilibre avec l'apport de sédiments venant de la rivière s'érode présentement et il en sera ainsi jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint.

Plusieurs grands tributaires de l'estuaire du Saint-Laurent ont été aménagés pour produire de l'électricité, ce qui a eu pour conséquence de piéger des sédiments qui autrement alimenteraient le littoral de l'estuaire (Long, 1983). L'impact de l'aménagement de la rivière aux Outardes a été évalué par Cataliotti-Valdina et Long (1984) qui ont démontré que, même si le débit

annuel demeure essentiellement le même, l'élimination de la crue printanière modifie profondément la dynamique du système, l'estuaire de la rivière devenant ainsi un piège plutôt qu'une source de sédiments littoraux pour l'estuaire du Saint-Laurent.

SÉDIMENTATION DANS LES PORTS

Les ports de l'estuaire du Saint-Laurent piègent de grandes quantités de sédiments (Ouellet et Sérodès, 1984). Les dragages d'entretien permettent de déterminer le flux de sédiments dans la mesure où les quantités de sédiments aussi bien que les superficies draguées sont déterminées avec précision. À Rivière-du-Loup, le bassin de tournage du quai des traversiers est dragué systématiquement tous les ans. Ces activités de dragage peuvent être interprétées sur le plan de la sédimentologie comme la vidange annuelle d'un immense piège à sédiments. Les résultats de ce dragage sont résumés au tableau I pour une période de 10 ans.

Les données du tableau I montrent que la sédimentation à l'entrée du port de Rivière-du-Loup est en moyenne de 1,37 m/an avec un écart type de 0,37 m/an sur une période de 10 ans. Ce taux de sédimentation est supérieur à celui obtenu dans le port par Troude et Ouellet (1987), qui ont mesuré une accumulation de 32 cm sur une période de 6 mois. Drapeau et Fortin (1978) ont, pour leur part, mesuré à l'entrée du port de Gros-Cacouna, situé à 10 km en aval de celui de Rivière-du-Loup, des profils de la vitesse du courant et de la concentration des sédiments durant des cycles de marée en juin, lorsque la charge de sédiments en suspension est élevée dans l'estuaire, et en septembre, lorsqu'elle est faible. Ces mesures ont permis de déterminer un transport résiduel vers l'intérieur du port de 13,1 tonnes par marée en juin et de 3,5 tonnes en septembre, des flux de sédiments inférieurs au taux de sédimentation dans ce port de 31 cm/an basé sur des différences de sondages entre 1968 et 1976.

DISCUSSION

Les principaux processus physiques qui déterminent la dynamique des sédiments littoraux ont été revus dans les

TABLEAU I
Dragage d'entretien, Rivière-du-Loup

Année	Volume (m ³)	Superficie (m ²)	Taux de sédimentation (m/an)
1988	41 400	32 000	1,29
1987	48 465	32 000	1,51
1986	26 875	32 000	0,84
1985	26 322	32 000	0,82
1984	67 563	40 000	1,69
1983	59 866	32 000	1,87
1982	44 666	32 000	1,40
1981	45 470	32 000	1,42
1980	62 192	32 000	1,94
1979	28 907	32 000	0,90

Source : Travaux Publics Canada, 1989, communication personnelle, dossier 3900-1

paragraphes qui précèdent. Reste à discuter des relations qui existent entre les processus sédimentologiques et l'évolution du littoral. L'évolution des plages sableuses ne présente pas de problème particulier, sauf que dans l'estuaire du Saint-Laurent on est rarement en mesure de définir les conditions initiales et les conditions aux limites qui permettent de quantifier la dynamique littorale des sédiments. Par contre, les processus qui commandent l'évolution des grands littoraux sableux sont bien identifiés; par exemple, ceux de la région de la rivière Moisie (Lessard et Dubois, 1984). Plusieurs plages sableuses de l'estuaire du Saint-Laurent sont des plages soulevées ou encore des plages piégées entre les promontoires rocheux. Ces plages accusent souvent un déficit en sédiments sableux, de sorte que des modèles quantitatifs du transport littoral sont difficilement applicables, même si les processus en cause sont bien identifiés. L'érosion de plusieurs littoraux à schorres du moyen estuaire soulève un problème d'interprétation de la dynamique sédimentaire. Un grand nombre de travaux font état de l'érosion de ces littoraux, entre autres, à l'île d'Orléans (Allard, 1981), au Cap Tourmente (Troude et Sérodes, 1985), à Montmagny (Dionne, 1986) et à Rivière-du-Loup (Dionne, 1986).

Une façon d'aborder l'érosion des littoraux est de considérer d'abord les processus fondamentaux et d'incorporer ensuite des paramètres additionnels pour tenir compte des conditions spécifiques à l'estuaire du Saint-Laurent. Dans cette perspective, la première étape consiste à définir le profil du littoral. Dean (1977) a pu démontrer qu'un grand nombre de profils littoraux sur la côte est des États-Unis pouvaient être définis par la relation

$$Y = aX^{2/3} \quad (1)$$

où «Y» et «X» sont les coordonnées verticale et horizontale du profil et «a» est une constante. Cette relation laisse supposer que les profils littoraux répondent à des lois physiques spécifiques, mais il faut disposer d'un modèle qui incorpore un plus grand nombre de paramètres pour être en mesure de caractériser les différents environnements rencontrés dans l'estuaire du Saint-Laurent. Plusieurs alternatives peuvent être choisies pour établir un modèle du profil du littoral. Bowen (1981) a proposé de s'en tenir aux paramètres les plus fondamentaux, c'est-à-dire d'une part l'action combinée des vagues et des courants et d'autre part la taille des sédiments et la pente du littoral. Bowen a utilisé comme hypothèses de travail initiales celles de Bagnold (1963), lequel a défini le transport des sédiments perpendiculaire au littoral en utilisant deux équations, l'une pour le transport par charriage (i_b) et l'autre pour le transport en suspension (i_s):

$$i_s = \frac{e_s \cdot c_d \cdot d_e \cdot u^3}{w - u \cdot \beta} \quad (2)$$

$$i_b = \frac{e_b \cdot c_d \cdot d_e \cdot u^3}{\tan \phi - u \cdot \beta / |u|} \quad (3)$$

où e_s et e_b sont des coefficients de rendement; c_d est un coefficient de traction; d_e est la densité de l'eau; u est la vitesse du courant à la surface du sédiment; w est la vitesse de sédimentation du sédiment; β est la pente du profil du littoral; ϕ est l'angle de friction des sédiments.

En posant les hypothèses appropriées, des équations sont dérivées pour établir une relation spécifique entre la pente littorale normalisée et la profondeur sous forme adimensionnelle. La relation entre ces deux paramètres est linéaire à l'intérieur de certaines limites (Bowen, 1981 : fig. 1.4). Pour appliquer ce modèle général à l'estuaire du Saint-Laurent, il suffit de choisir des conditions hydrodynamiques suffisamment énergétiques pour modéliser le profil du littoral qui nous intéresse; par exemple, des conditions limites de vagues de 1,4 m de hauteur et d'une période de 6 s. On obtient ainsi différents profils littoraux selon la taille caractéristique des sédiments. Les résultats de l'application du modèle de Bowen pour ces valeurs apparaissent à la figure 2. Cette figure montre que la forme et, surtout, la profondeur du profil littoral par rapport à la distance du haut de plage changent en fonction de la granulométrie des sédiments; les littoraux constitués de sédiments plus fins ayant des pentes plus faibles.

La comparaison de profils théoriques (fig. 2) avec un profil typique du littoral de l'estuaire dans la région de Kamouraska, représenté à la figure 3, montre que le modèle de Bowen, même s'il n'a pas été conçu pour ce type d'environnement, reproduit bien la partie inférieure du littoral qui est soit une slikke, soit encore le profil d'érosion des argiles de la Mer de Goldthwait couvertes de quelques centimètres de vase (Dionne, 1970). Cependant, le profil du schorre diffère substantiellement du profil théorique défini plus haut, qui fait intervenir uniquement l'action à long terme des vagues et la texture des sédiments. Dans l'estuaire du Saint-Laurent, d'autres paramètres doivent être pris en considération pour être en mesure d'expliquer la dynamique sédimentaire du littoral; notamment les variations du niveau marin, les tempêtes et la végétation intertidale.

Les variations du niveau marin: Une variation du niveau marin a pour conséquence de déplacer le profil littoral, provoquant à la fois de l'érosion et de la sédimentation à des niveaux différents, selon qu'il s'agisse d'une transgression ou d'une régression. Dohler et Ku (1970) ont analysé les enregistrements des principales stations marégraphiques canadiennes. Ils ont examiné en détail les enregistrements des marégraphes de Québec et de Pointe-au-Père de 1900 à 1967, soit sur une période suffisamment longue pour définir les mouvements séculaires. Les résultats de leur analyse sont reproduits au tableau II. Les données de ce tableau indiquent un abaissement du niveau marin à Pointe-au-Père et à Québec alors que Emery et Aubrey (1991) rapportent une submersion pour ces mêmes endroits. Dohler et Ku (1970) ont utilisé les mesures

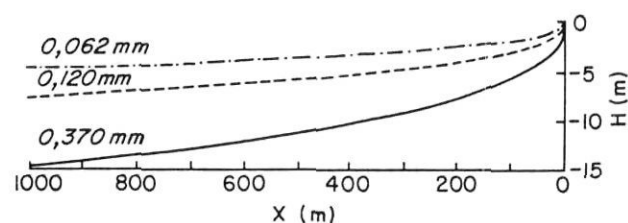


FIGURE 2. Profils du littoral obtenus en utilisant le modèle de Bowen (1981) pour des sédiments de 0,062, 0,120 et 0,370 mm de diamètre. Profiles of the nearshore zone obtained using Bowen (1981) model for sediment grain size of 0.062, 0.120 and 0.370 mm.

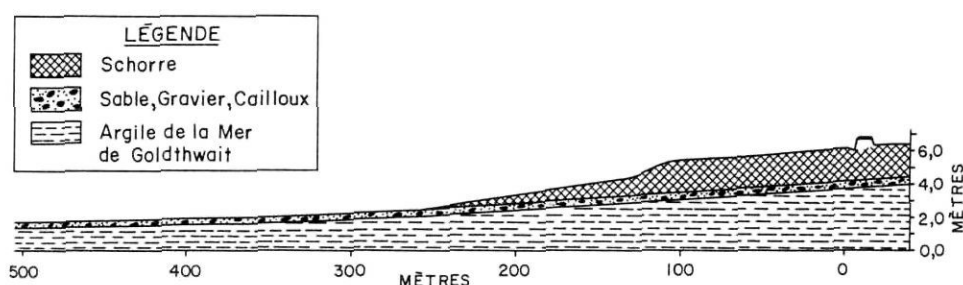


FIGURE 3. Coupe du littoral dans la région de Kamouraska, d'après Champagne et al. (1983).

Cross-section of the intertidal zone in Kamouraska area, after Champagne et al. (1983).

TABLEAU II
Abaissement du niveau marin (1900-1967)

	Variation (mm/an)	Erreur normale (mm/an)
Québec	0,305	0,518
Pointe-au-Père	0,213	0,122

d'après Dohler et Ku (1970)

originales des marégraphes pour effectuer leurs calculs, ce qui leur a permis de vérifier diverses sources d'erreur et de tenir compte de plusieurs paramètres, notamment des variations de la pression atmosphérique. Les travaux de Vanicek (1976) confirment les résultats de Dohler et Ku en montrant les tendances régionales. Les valeurs du tableau II sont les plus fiables pour ce qui touche les variations contemporaines du niveau marin dans l'estuaire du Saint-Laurent, car elles sont des mesures directes, alors que plusieurs mesures rapportées dans la littérature sont des mesures indirectes. De toute façon, l'abaissement du niveau marin est présentement très faible dans l'estuaire du Saint-Laurent. Une variation aussi petite ne peut provoquer une érosion littorale de l'importance de celle qui a été observée à plusieurs endroits au cours des dernières décennies.

Les tempêtes: La région de Rivière-du-Loup est la mieux documentée pour analyser l'impact des tempêtes sur le littoral. L'érosion du littoral y est importante. Dionne (1986) a suivi l'érosion récente du littoral dans la région de Rivière-du-Loup et les mesures qu'il a faites montrent un recul du schorre supérieur de 30 à 40 mètres en 18 ans. Cette érosion peut être évaluée en fonction de mesures de vents, vagues et courants (Travaux publics Canada, 1986) et de l'importance des tempêtes (Ouellet et Dupuis, 1988) dans la région de Rivière-du-Loup.

L'érosion du littoral nécessite des conditions de haute énergie qui sont le plus souvent associées aux tempêtes. Les tempêtes qui traversent l'estuaire du Saint-Laurent ont le potentiel de provoquer l'érosion du littoral parce qu'elles regroupent normalement deux phénomènes: la basse pression atmosphérique et la poussée du vent qui augmentent le niveau d'eau dans la zone littorale d'une part et d'autre part les vagues générées par le vent, qui ont un effet constructeur dans des conditions normales, mais qui sont néanmoins le principal agent d'érosion du littoral par charriage et par remise en suspension des sédiments durant les tempêtes. La fréquence des

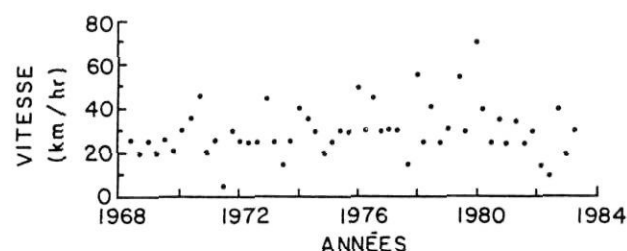


FIGURE 4. Série temporelle des vitesses maximales du vent pendant la période de hauts niveaux d'eau, d'après Ouellet et Dupuis (1988).

Time series of maximum wind speeds during high water levels, after Ouellet and Dupuis (1988).

tempêtes, particulièrement l'élévation des niveaux d'eau associée aux vents forts, a été analysée par Ouellet et Dupuis (1988) à plusieurs endroits dans l'estuaire du Saint-Laurent. Les résultats obtenus pour la région de Rivière-du-Loup sont illustrés à la figure 4. D'autre part, Travaux publics Canada (1986) a commandité une étude sur l'envasement du port de Rivière-du-Loup qui a fourni un ensemble de mesures du vent, des vagues et des courants à proximité du port (fig. 5). Les mesures de vagues fortes au cours de cette période sont reproduites au tableau III et comparées à la figure 6 avec les vitesses du vent qui les ont produites.

Les vagues produites par des vents forts au courant de l'automne 1985 sont représentatives des conditions qui prévalent à long terme dans cette région, comme l'indique la comparaison des vitesses du vent de la figure 6 avec celles de la figure 4. Les vitesses des courants près du littoral à l'ouest du port de Rivière-du-Loup (fig. 5: mouillages C-1, C-2 et C-3) sont reproduites à la figure 7. Nous n'avons pas de mesures de courants à l'emplacement même où Dionne (1986) a observé l'érosion du schorre, mais les mesures à proximité nous permettent de supposer que les courants de marée atteignent de 20 à 40 cm/s à cet endroit. En se servant de ces mesures de courants et des mesures de vagues du tableau III, on peut calculer le transport par charriage aussi bien que le transport par suspension pour différents niveaux de la marée en utilisant un modèle élaboré par Van Rijn (1989) dont les résultats sont illustrés à la figure 8. Les taux de transport par charriage et par suspension illustrés sur cette figure montrent que les conditions hydrodynamiques prévalant à Rivière-du-Loup, et ailleurs dans le moyen estuaire (Ouellet et Dupuis, 1988), sont suffisamment énergétiques pour maintenir un profil d'équilibre concave, semblable à ceux de la figure 2, sur toute la longueur de l'estran. L'érosion du schorre observée dans la région de Rivière-du-

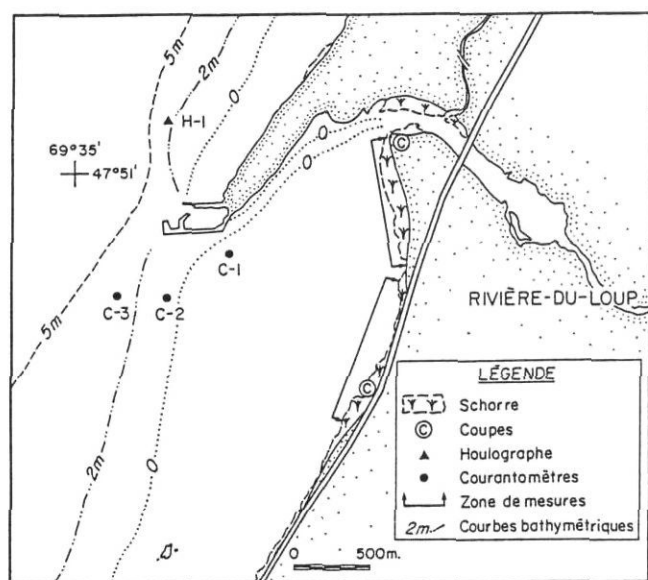


FIGURE 5. Carte de localisation des courantomètres (C-1, C-2 et C-3) et du houlographe (H-1) mouillés près du port de Rivière-du-Loup. La localisation des mesures d'érosion de Dionne (1986) et des coupes stratigraphiques de Dionne (1990) est aussi indiquée sur la carte.

Location map of current meters (C-1, C-2 and C-3) and wave meter (H-1) moored near Rivière-du-Loup Harbour. Location of erosion measurements from Dionne (1986) and cross-sections from Dionne (1990) are also shown on the map.

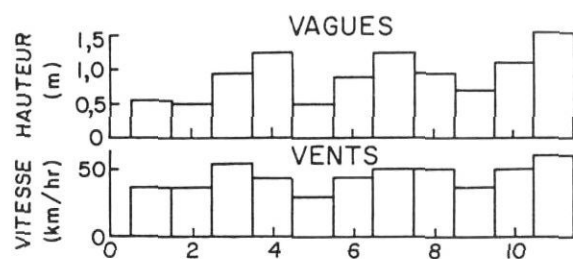


FIGURE 6. Histogrammes illustrant la corrélation entre la hauteur des vagues et les vents forts au port de Rivière-du-Loup pour les onze événements décrits au tableau III.

Histograms showing the correlation between wave heights and strong winds at Rivière-du-Loup Harbour for the eleven events described in Table III.

Loup (Dionne, 1986) n'a donc rien de surprenant; on pourrait s'attendre à pire, si ce n'était de la résistance du schorre à l'érosion.

La végétation: La prémisse de cette discussion suppose que si la végétation n'existait pas, les littoraux de l'estuaire auraient des profils concaves sur toute leur longueur semblables à ceux qui sont reproduits à la figure 2. En d'autres termes, si seuls les forces hydrodynamiques et les sédiments étaient en cause, il y aurait équilibre entre l'action des vagues qui tend à pousser les sédiments vers le haut du littoral et la force de la gravité qui tend à faire glisser ces mêmes sédiments vers le bas de la pente que forme le littoral. Cet équilibre ne

TABLEAU III

Caractéristiques des vagues fortes
Rivière-du-Loup – Automne 1985

N°	Date jj/mm	Vagues		Vente	
		Hauteur m	Période s	Vitesse km/hr	Direction (N/E/S/W)
1	15/09	0,55	4,1	36	W
2	18/09	0,50	3,3	36	W
3	21/09	0,95	4,3	54	W
4	28-29/09	1,25	4,3	43	W
5	01-02/10	0,50	4,1	29	NE
6	05-06-07/10	0,90	4,0	43	SW
7	09-10-11/10	1,25	3,9	50	SW
8	20-21-22/10	0,95	3,9	50	N
9	25-26/10	0,70	3,0	36	SW
10	27-28-29/10	1,10	4,4	50	N
11	06-07/11	1,55	5,7	—	—

d'après Travaux publics Canada, 1986

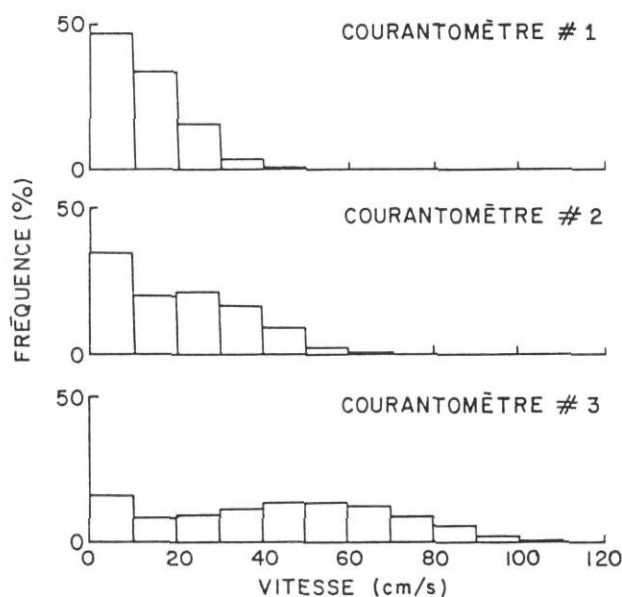


FIGURE 7. Histogrammes permettant de comparer la répartition des vitesses des courants aux mouillages C-1, C-2 et C-3.

Histograms outlining current speed distribution at moorings C-1, C-2 and C-3.

serait pas pour autant statique; les sédiments répondraient aux variations de l'énergie des vagues dissipée sur le littoral, de sorte que lorsque l'énergie des vagues excède les niveaux auxquels les profils sont ajustés, une partie de cette énergie est réfléchiée et une charge correspondante de sédiments est entraînée vers le bas de la pente littorale. C'est ainsi que sur les plages sableuses on assiste à l'apparition saisonnière des profils d'hiver (érosion) et des profils d'été (sédimentation). Ces processus d'ajustement sont universels dans la zone littorale, mais ils sont moins évidents en présence de végétation.

À mesure que des plantes prennent racine dans la zone intertidale, d'une part les racines consolident les sédiments en

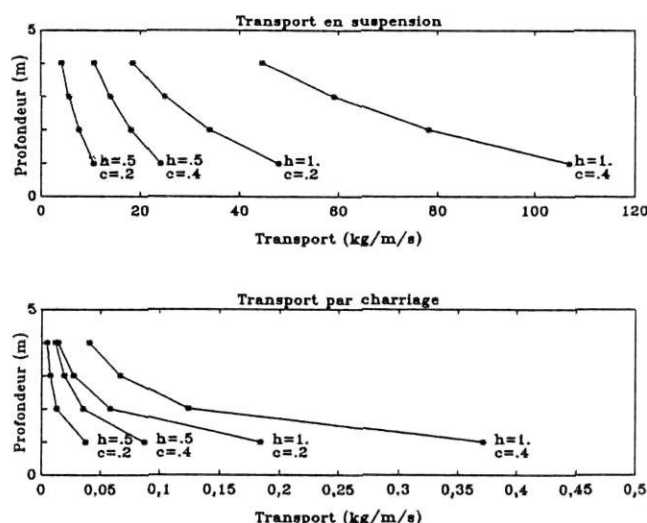


FIGURE 8. Transport par charriage et par suspension en fonction de la profondeur d'eau. Les hauteurs de vagues «*h*» en mètres et les vitesses de courants «*c*» en mètres/seconde sont indiquées pour chaque série de calculs.

*Bedload and suspension load as a function of water depth. Wave heights «*h*» in metres and current velocities «*c*» in metres/second are shown for different calculations.*

place et d'autre part la tige de la plante offre une résistance au courant, le ralentit et favorise le dépôt des sédiments en suspension (Sheng, 1986). Ce processus mène à la formation des marais intertidaux qui développent une écologie complexe où différentes plantes prédominent selon le pourcentage d'inondation, aussi bien pour les littoraux océaniques (Verger, 1968) que pour ceux de l'estuaire du Saint-Laurent (Couillard et Grondin, 1986).

Plusieurs travaux font état de l'accumulation de sédiments sur le schorre dans le moyen estuaire (voir tableau I dans Dionne, 1990). À Rivière-du-Loup, Dionne (1990) montre deux coupes du schorre supérieur de 100 et 140 cm d'épaisseur, reposant sur une surface d'érosion et datant d'environ 290 ans BP. Dans la baie de Kamouraska, trois carottes prélevées au droit du littoral (Séroudes, Dubé et Deschênes, 1983) montrent d'abord que le profil d'érosion que l'on trouve sous le schorre a la même pente que la slikke, ce qui milite en faveur du concept selon lequel le schorre est construit au-dessus du profil hydrodynamique d'équilibre que représente celui de la slikke. Une carotte prise à 50 m de la limite inférieure du schorre révèle une épaisseur de schorre de 80 cm à cet endroit. À une distance de 170 m, une carotte de 150 cm n'a pas pénétré toute l'épaisseur du schorre, ce qui montre l'épaississement du schorre vers le haut du littoral. Champagne, Denis et Lebel (1983) ont étudié six profils du littoral entre Andréville et Pointe-aux-Orignaux sur la rive sud du moyen estuaire (fig. 3). Leurs profils montrent que le schorre commence à se former à mi-hauteur de la marée pour atteindre une épaisseur de 150 à 250 cm au niveau de la marée haute.

CONCLUSIONS

Le rôle que la glace joue sur le plan de la dynamique sédimentaire dans l'estuaire du Saint-Laurent a été mis en

évidence dans les paragraphes précédents. C'est ce qui caractérise le Saint-Laurent par rapport à la plupart des autres grands estuaires.

L'approche la plus efficace pour analyser la dynamique sédimentaire des littoraux d'un environnement aussi complexe que l'estuaire du Saint-Laurent consiste à distinguer les environnements où la végétation est présente par rapport à ceux qui sont déterminés uniquement par des processus hydrodynamiques. Les plages de sable dans l'estuaire du Saint-Laurent répondent aux contraintes hydrodynamiques de leur environnement avec cette particularité que le balancement de la marée répartit l'énergie des vagues sur une plus grande superficie. Le nombre aussi bien que la dimension des plages sont limités par la quantité de matériel disponible.

La partie inférieure du littoral, en deçà du niveau moyen de la marée, est composée soit d'une slikke ou simplement d'une simple couche de vase de quelques centimètres d'épaisseur qui recouvre les argiles de la Mer de Goldthwait. Dans un cas comme dans l'autre, le profil de la partie inférieure du littoral épouse la forme de profil qui correspond à l'équilibre qui s'établit entre les forces hydrodynamiques et la taille des sédiments, comme le montre la comparaison du profil théorique de la figure 2 avec le profil de la région de Kamouraska illustré à la figure 3. L'augmentation de la cohésion des vases de la partie inférieure du littoral par la sécrétion de mucus polysaccharidique par des diatomées épipéliques reste à vérifier (Paterson, 1989).

La dynamique sédimentaire de la moitié supérieure du littoral est compliquée par la présence de la végétation qui forme les schorres. Contrairement à l'interprétation souvent fournie selon laquelle les schorres croissent à mesure que change le niveau marin, la présente interprétation implique que le schorre n'est pas simplement colonisé par la végétation à mesure que la sédimentation progresse; c'est au contraire la végétation qui provoque la sédimentation. Une fois établie, la végétation est à l'origine de la sédimentation et non l'inverse comme on le croit souvent. Des mesures de la sédimentation du schorre dans le moyen estuaire, déterminées par des datations au ^{14}C , sont regroupées sur la figure 9. La pente de régression reproduite sur cette figure correspond à une sédimentation annuelle de 2,4 mm; un taux supérieur d'un facteur 10 à l'abaissement actuel du niveau marin qui se situe entre 0,2 et 0,3 mm annuellement (Dohler et Ku, 1970).

La sédimentation du schorre est particulièrement bien illustrée sur la coupe n° 5 effectuée par Champagne et al. (1983) sur le littoral de la région de Kamouraska reproduite à la figure 3. La coupe montre que le littoral actuel repose sur les argiles de la Mer de Goldthwait. Ces argiles sont recouvertes d'une couche uniforme de sable et gravier de 10 à 30 cm d'épaisseur qui traverse toute la zone littorale. Cette couche de sable et gravier est utilisée comme un horizon repère pour les fins de la présente discussion. Dans la partie inférieure du littoral, en deçà du niveau moyen de la marée, cette couche de sable et gravier est recouverte d'une mince couche de vase de quelques centimètres d'épaisseur. L'horizon repère, qu'est cette couche de sable et gravier, correspond au profil hydrodynamique du littoral défini précédemment. En effet, si cet horizon repère ne concordait pas avec le profil hydrodynamique

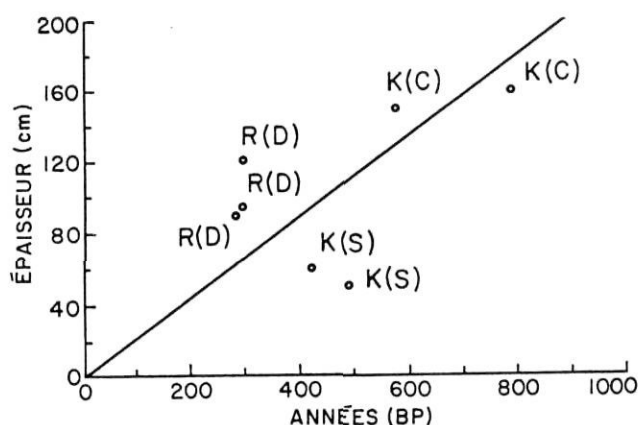


FIGURE 9. Mesures de l'épaisseur du schorre en fonction du temps: R = Rivière-du-Loup; K = Kamouraska; (C) = Champagne et al. (1983); (D) = Dionne (1990); (S) = Sérodes et al. (1983).

Tidal marsh thickness as a function of time: R = Rivière-du-Loup; K = Kamouraska; (C) = Champagne et al. (1983); (D) = Dionne (1990); (S) = Sérodes et al. (1983).

caractéristique de ce littoral, il serait érodé à certains endroits, compte tenu de sa faible épaisseur.

Dans la partie du littoral au-dessus du niveau moyen de la marée, cet horizon repère est recouvert de sédiments typiques du schorre. Selon l'hypothèse avancée, cet horizon repère représente la position du profil hydrodynamique sur toute la longueur du littoral. Le schorre s'est donc développé au-dessus du profil hydrodynamique. Ce processus est rendu possible seulement par le biais de la végétation qui retient en place des sédiments qui seraient autrement instables. À mesure que le schorre progresse au-dessus du profil d'équilibre, il est soumis d'une façon de plus en plus intense au stress hydrodynamique. C'est ce qui explique que l'érosion du schorre soit souvent spectaculaire, parce qu'elle est rapide par rapport à celle des autres zones de l'environnement littoral.

La morphologie du schorre est quand même commandée par l'hydrodynamique littorale, même si le profil est surélevé par rapport au profil d'équilibre. Les plantes du schorre ne peuvent retenir que les sédiments qui y sont transportés; la croissance du schorre est donc dépendante de l'apport de sédiments. Cet apport de sédiments dépend de plusieurs paramètres, particulièrement du régime hydrodynamique et des concentrations de sédiments dont les variations saisonnières ont été décrites dans la première partie de cet essai. Le bilan de la sédimentation peut être positif ou négatif; il faut que les courants soient suffisamment intenses pour transporter une charge de sédiments en suspension; cependant s'ils sont trop forts, ils vont provoquer l'érosion plutôt que la sédimentation. Par exemple, Sérodes et al. (1983) ont montré comment le concept de baie abritée (*headland bay*, *spiral bay*) expliquait le changement de forme des profils littoraux dans la baie de Kamouraska, selon la variation de l'énergie des vagues d'une extrémité à l'autre de la baie.

En fait, le concept selon lequel le schorre développe sa propre dynamique sédimentaire n'est pas nouveau. Shaler (1886) faisait remarquer que sauf pour les récifs coralliens, il n'existe pas dans la nature de situation où l'adaptation de la

végétation à l'environnement physique soit aussi bien réussie que dans le développement des marais intertidaux. L'analogie entre le schorre et les récifs coralliens est réelle. Pour s'en convaincre, il suffit d'envisager la déstabilisation phénoménale du littoral qu'entraînerait la disparition du schorre si la végétation périssait, par exemple à cause d'un taux de pollution trop élevé.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie le comité de rédaction de *Géographie physique et Quaternaire*, en particulier M. J.-C. Dionne pour ses commentaires et suggestions. L'auteur remercie aussi M. P. Bertrand et un lecteur anonyme pour avoir revu le manuscrit.

Cette publication est une contribution du Centre océanographique de Rimouski — une collaboration de l'INRS (Institut national de la recherche scientifique) et de l'UQAR (Université du Québec à Rimouski) placée sous les auspices de l'Université du Québec. Cette recherche a été subventionnée par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (subventions A0585 et OGP0000595).

RÉFÉRENCES

- Allard, M., 1981. L'Anse aux Canards, île d'Orléans, Québec: évolution Holocène et dynamique actuelle. *Géographie physique et Quaternaire*, 35(2): 133-154.
- Allard, M. et Champagne, P., 1980. Dynamique glacielle à la pointe d'Argenteau, île d'Orléans, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 34(2): 159-174.
- d'Anglejan, B., Ingram, R. G. et Savard, J. P., 1981. Suspended-sediment exchanges between the St. Lawrence Estuary and a coastal embayment. *Marine Geology* 40: 85-100.
- Bagnold, R. A., 1963. Mechanics of marine sedimentation, p. 507-528. In M. N. Hill, éd., *The Sea*, vol. 3. Interscience.
- Bowen, A. J. 1981. Simple models of nearshore sedimentation; beach profiles and longshore bars, p. 1-11. In S. B. McCann, éd., *The Coastline of Canada*. Publ. 80-10, Geological Survey of Canada.
- Brochu, M., 1960. Dynamique et caractéristique des glaces de dérive de l'estuaire et de la partie nord-est du golfe du Saint-Laurent. Min. des Mines et relevés techniques, Ottawa, Étude géographique n° 24, 93 p.
- 1961. Déplacement de blocs et d'autres sédiments par la glace sur les estrans du Saint-Laurent en amont de Québec. Min. des Mines et Relevés techniques. *Revue canadienne des sciences de la terre*, Étude géographique 30, 16 p.
- Cataliotti-Valdina, D. et Long, B. F., 1984. Évolution estuarienne d'une rivière régularisée en climat sub-boréal; la rivière aux Outardes (côte nord du golfe du Saint-Laurent, Québec). *Revue canadienne des sciences de la terre*, 21(1): 25-34.
- Champagne, P., Denis, R. et Lebel, C., 1983. Établissement de modèles caractérisant l'équilibre dynamique des estrans de la rive sud du moyen estuaire du Saint-Laurent. Pêches et Océans Canada. Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques n° 1711, 67 p.
- Couillard, L. et Grondin, P., 1986. La végétation des milieux humides du Québec. *Environnement Québec*, 400 p.
- Dawson, J. W., 1886. Note on boulder drift and sea margin at Little Metis, lower St. Lawrence. *Canadian Record Science* 2(1): 36-38.
- Dean, R. G. 1977. Equilibrium beach profiles. U.S. Atlantic and Gulf Coasts, Ocean Engineering Report 12, Dept. of Civil Engineering, University of Delaware, 45 p.
- Dionne, J.-C., 1969. Tidal flat erosion by ice at La Pocatière, St. Lawrence Estuary. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39(3): 1174-1181.

- . 1970. Aspects morpho-sédimentologiques du glacial, en particulier des côtes du Saint-Laurent. *Laboratoire de Recherches forestières, RIQFX-9*, 324 p.
- . 1972. Caractéristiques des blocs erratiques des rives de l'estuaire du Saint-Laurent. *Revue de géographie de Montréal*, 26(2): 125-152.
- . 1984. An estimate of ice-drifted sediments based on mud content of the ice cover at Montmagny, Middle St. Lawrence Estuary. *Marine Geology*, 57: 149-166.
- . 1985b. Tidal marsh erosion by geese, St. Lawrence Estuary, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 39(1): 99-105.
- . 1985a. Formes, figures et faciès sédimentaires glaciels des estrans vaseux des régions froides. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 51: 415-451.
- . 1986. Érosion récente des marais intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*, 40(3): 307-323.
- . 1987. La charge sédimentaire glacielle des rivages du haut estuaire de Saint-Laurent. *Comptes rendus Conférence canadienne sur le littoral (Québec - 1987)*, CNRC, p. 67-96.
- . 1988. Ploughing boulders along shorelines with particular reference to the St. Lawrence Estuary. *Geomorphology*, 1(4): 297-308.
- . 1989a. The role of ice and frost in tidal marsh development. A review with particular reference to Quebec. *Essener Geographische Arbeiten*, 18: 171-210.
- . 1989b. Boulder Barricades in the St. Lawrence Estuary and Gulf, Québec, Canada. *Second International Conference on Geomorphology (Frankfurt)*. Abstract of Pesters and Papers. *Geoko-Plus*, 1: 75.
- . 1990. Observations sur le niveau marin relatif à l'Holocène à Rivière-du-Loup, estuaire du Saint-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 44(1): 43-53.
- Dionne, J.-C. et Brodeur, D., 1988a. Érosion de plate-formes rocheuses littorales par affouillement glacial. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. 32(1): 101-115.
- . 1988b. Forest weathering and ice action in shore platform development with particular reference to Quebec, Canada. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. Bd., 71: 117-130.
- Dohler, G. C. et Ku, L. F. 1970. Presentation and assessment of tides and water level records for geophysical investigations. *Journal canadien des sciences de la terre*, 7: 607-625.
- Drapeau, G. et Fortin, G., 1978. Tidal sedimentation in Gros-Cacouna Harbour. *Proceedings 16th International Conference on Coastal Engineering ASCE*, p. 1986-2000.
- Drapeau, G. et Mercier, O., 1990. Modélisation de l'évolution du littoral des îles de la Madeleine, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 44(2): 217-226.
- Drapeau, G. et Morin, R., 1981. Contributions des vagues au transport des sédiments littoraux dans la région de Trois-Pistoles, estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*, 35: 245-251.
- Dubois, J.-M. M., 1980. Géomorphologie littorale de la côte nord du Saint-Laurent, p. 215-238. In B. McCann éd., *The Coastline of Canada*. Geological Survey of Canada, Paper 80-10.
- Emery, K. O. et Aubrey, D. G., 1991. Sea levels, land levels, and tide gauges. *The Permanent Service for mean sea level*. Institute of Oceanographic Sciences, Springer-Verlag, New York, 237 p.
- Godin, G., 1979. La marée dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent. *Naturaliste canadien*, 106(1): 105-121.
- Guilcher, A., 1981. Cryoplanation littorale et cordons glaciels de basse mer dans la région de Rimouski. *Géographie physique et Quaternaire*, 35 (2): 133-154.
- Lambert, N. 1985. Évolution de l'estuaire de la rivière Saint-Jean. *Mémoire de maîtrise*, Université du Québec à Rimouski.
- Langbein, W. B. et Schumm, S. A., 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Transactions American Geophysical Union*, 39: 1076-84.
- Lessard, G. L. et Dubois, J.-M. M., 1984. Évolution littorale multitemporelle d'une côte récemment déglacée du nord du golfe du Saint-Laurent. *Revue de géomorphologie dynamique*, 33(3): 83-96.
- Long, B. F., 1983. Evolution of the Outardes estuary after the hydraulic power regulation, p. 327-328. In B. J. Holden, éd., *Proceedings of the Canadian Coastal Conference 1983*.
- Lucotte, M. et d'Anglejan, B., 1986. Seasonal control of the St. Lawrence maximum turbidity zone by tidal-flat sedimentation. *Estuaries*, 9(2): 84-94.
- Markham, W. E., 1980. Atlas des glaces de l'est canadien. *Environnement Canada, Service de l'Environnement atmosphérique*, 33 p.
- Michel, B. et Bérenger, D., 1972. L'hiver glaciologique le long du fleuve Saint-Laurent, p. 1251-1282. In *Le rôle de la neige et de la glace en hydrologie*, Actes des colloques de Banff-1972. Association internationale d'Hydrologie scientifique, vol. 2.
- Ouellet, Y. et Dupuis, P., 1988. Choice of water level elevation for the design of coastal structures, p. 395-410. In M. I. El-Sabbh et T. S. Murty, éd., *Man-made Hazards*. Reidel.
- Ouellet, Y. et Sérodes, J.-B., 1984. Problèmes d'agitation et de sédimentation des ports de refuge. *Assises annuelles, Association québécoise des techniques de l'eau*, p. 113-141.
- Paterson, D. M., 1989. Short-term changes in the erodibility of intertidal cohesive sediments related to the migratory behaviour of epipelagic diatoms. *Limnology and Oceanography*, 34: 223-234.
- Pêches et Océans Canada, 1988. *Service des données sur le milieu marin*. Ottawa.
- Reed, A., 1984. Production of *Scirpus Americanus* and its use by greater snow geese at Cap-Tourmente National Wildlife Area. *Draft of a paper presented at the 5th American Snow Goose Conference, Québec, Oct. 4-7, 1984*.
- Sérodes, J.-B. et Dubé, M., 1983. Dynamique sédimentaire d'un estran à spartines (Kamouraska, Québec). *Naturaliste canadien* 110: 11-26.
- Sérodes, J.-B., Dubé, M. et Deschênes, J., 1983. Étude de la dynamique sédimentaire et du pouvoir de transformation des zones intertidales de l'estuaire du Saint-Laurent — cas des estrans de Kamouraska. *Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures*, 90 p.
- Sérodes, J.-B. et Troude, J. P., 1984. Sedimentation cycle of a freshwater tidal flat in the St. Lawrence Estuary. *Estuaries* 7(2): 119-124.
- Shaler, N. S., 1886. Preliminary report on seacoastswamps of the Eastern United States. *U.S. Geological Survey, 6th Annual Report*. 364 p.
- Sheng, Y. P., 1986. Modeling bottom boundary layer and cohesive sediment dynamics in estuarine and coastal waters, p. 360-400. In A. J. Mehta, éd., *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, Springer-Verlag.
- Travaux Publics Canada, 1986. Étude d'envasement du port de Rivière-du-Loup. *Dossier 85-05*, 81 p., 6 annexes.
- Troude, J. P. et Ouellet, Y., 1987. Phénomènes contribuant à l'envasement du port de Rivière-du-Loup. *Proceedings Canadian Coastal Conference 1985, National Research Council*, p. 297-311.
- Troude, J. P. et Sérodes, J.-B., 1985. Régime morpho-sédimentologique d'un estran à forte sédimentation dans l'estuaire du Saint-Laurent. *Proceedings of the Canadian Coastal Conference 1985, National Research Council*, p. 105-119.
- . 1988. Le rôle des glaces dans le régime morpho-sédimentologique d'un estran de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. *Revue canadienne de génie civil*, 15: 348-354.
- Vanicek, P., 1976. Pattern of recent vertical movements in Maritime Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 13: 661-667.
- Van Rijn, L. C., 1989. *Handbook Sediment Transport by Currents and Waves*. Delft Hydraulics Report, H 461.
- Verger, F., 1968. *Marais et Wadden du littoral français*. Biscaye Frères, Bordeaux, 541 p.
- Vigeant, G., 1984. Cartes climatologiques du Saint-Laurent. *Environnement Canada, Service de l'Environnement atmosphérique*.